

Requested Patent: FR2642833A1

Title: ;

Abstracted Patent: FR2642833 ;

Publication Date: 1990-08-10 ;

Inventor(s): BRUNET MICHEL; COSNARD ERIC; DELTOUR BERNARD ;

Applicant(s): VISION 3D (FR) ;

Application Number: FR19890001595 19890206 ;

Priority Number(s): FR19890001595 19890206 ;

IPC Classification: G01B11/03; G01B11/24 ;

Equivalents:

DE69003090D, DE69003090T, DK452422T, EP0452422 (WO9008939), B1,
ES2046776T, WO9008939 ;

ABSTRACT:

The invention relates to a method for calibrating a system for the tri-dimensional acquisition of shape or form. The method comprises first the acquisition of the form of a calibration sight plate (4) having known geometrical reliefs in order to memorize gross information representative of echos of said sight perceived by the system. The adequation between the gross information and the geometrical definition information concerning said sight plate allows to establish the global transfer function of the system which, during measurements, allows to transform the gross information relative to any form or shape into coordinates (x, y, z) in an absolute reference frame.

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

①1 N° de publication :
(à n'utiliser que pour les
commandes de reproduction)

2 642 833

②1 N° d'enregistrement national :

89 01595

⑤1 Int Cl⁵ : G 01 B 11/24, 11/03.

⑫

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 6 février 1989.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la
demande : BOPI « Brevets » n° 32 du 10 août 1990.

⑥0 Références à d'autres documents nationaux appa-
rentés :

⑦1 Demandeur(s) : VISION 3D, Société Anonyme. — FR.

⑦2 Inventeur(s) : Michel Brunet; Eric Cosnard; Bernard
Deltour.

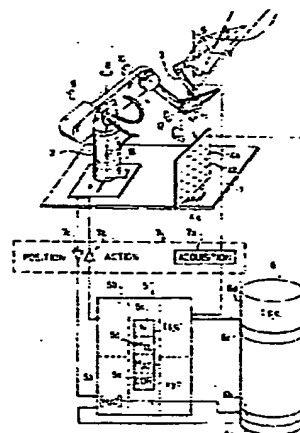
⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire(s) : Cabinet Barre-Gatti-Laforge.

⑤4 Procédé d'étalonnage d'un système d'acquisition tridimensionnelle de forme et système d'acquisition pour la mise
en œuvre dudit procédé.

⑤7 L'invention concerne un procédé d'étalonnage d'un sys-
tème d'acquisition tridimensionnelle de forme. Ce procédé
consiste à réaliser préalablement l'acquisition de la forme d'une
mire de calibration 4 possédant des reliefs de géométrie
connus en vue de mémoriser des informations brutes repré-
sentatives des échos de ladite mire perçus par le système.

L'adéquation entre ces informations brutes et des informa-
tions de définition géométrique concernant ladite mire permet
d'établir la fonction de transfert globale du système qui, lors
des mesures, permet de transformer les informations brutes
relatives à une forme quelconque en coordonnées x, y, z dans
un référentiel absolu.



FR 2 642 833 - A1

D

PROCÉDE D'ETALONNAGE D'UN SYSTEME D'ACQUISITION
TRIDIMENSIONNELLE DE FORME ET SYSTEME D'ACQUISITION POUR LA
MISE EN OEUVRE DUDIT PROCÉDE

5

L'invention concerne un procédé d'étalonnage d'un système d'acquisition de forme possédant un ensemble-capteur mobile, apte à délivrer les coordonnées (x,y,z) représentatives de la forme d'un objet tridimensionnel dans un référentiel dit absolu (X,Y,Z) ; le procédé de l'invention vise à établir la fonction de transfert globale entre des informations, dites brutes, délivrées par l'ensemble-capteur du système d'acquisition et les coordonnées réelles (x,y,z) de la surface de l'objet en cours d'acquisition. L'invention s'étend au système d'acquisition permettant la mise en oeuvre du procédé visé, système d'acquisition du type comprenant un bâti fixe auquel est lié le référentiel absolu, un organe terminal mobile auquel est lié un référentiel dit terminal (R,S,T) , un jeu d'actionneurs adapté pour mouvoir l'organe terminal par rapport au bâti fixe, des moyens (18, 7c, 6a, 6b, 5a) de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe apte à mémoriser une matrice M_{AT} de passage du référentiel terminal (R,S,T) au référentiel absolu (X,Y,Z) , l'ensemble capteur sus-évoqué porté par l'organe terminal et adapté pour émettre vers l'objet tridimensionnel une onde structurée et pour capter l'écho renvoyé par ledit objet, et des moyens de stockage des informations issues de l'ensemble-capteur dites informations brutes, représentatives des échos captés.

30

On connaît de tels systèmes d'acquisition (également désigné parfois sous le terme : système de numérisation ou "C.N.M." : "Coordinates Measuring Machine") qui sont en particulier utilisés dans les tomographes, échographes, scanners, etc... Dans la plupart de ces systèmes, l'ensemble-capteur comprend un système d'éclairage apte à émettre au moins un faisceau lumineux vers l'objet et un dispositif vidéo apte à filmer l'objet avec une parallaxe constante par rapport aux faisceaux du système d'éclairage en vue de délivrer des informations brutes (p,q) fonction des colonnes (p) et lignes (q) des images des points de la trace

40

de chaque faisceau sur l'objet. Dans les brevets FR 76.06176, FR 79.28885, FP 81.24418, WO 87/01194, EP 0.163.076, FP 0.222.498, le ou les faisceaux du système d'éclairage sont
5 de type lamellaire (plan laser notamment) et le système numérise l'intersection de chaque plan laser avec l'objet.

Ces systèmes posent un problème mal résolu à l'heure actuelle qui est de relier les informations brutes délivrées par l'ensemble-capteur (qui sont dépendantes de ce
10 dernier) aux positions réelles des points de la surface de l'objet (indépendamment de l'ensemble-capteur qui a permis d'effectuer le relevé), c'est-à-dire d'élaborer à partir de ces informations brutes les coordonnées métriques de ces points dans un référentiel déterminé.

15 Les systèmes connus, notamment du type sus-évoqué, réalisent la liaison entre les informations brutes et les coordonnées réelles des points par une connaissance préalable de la géométrie du système d'éclairage par rapport au dispositif vidéo (détermination préalable de la parallaxe,
20 de la focale de l'objectif, des caractéristiques de l'élément photosensible...). Ces systèmes nécessitent donc la mesure de l'ensemble de ces paramètres pour les étalonner, ce qui est en pratique difficile et source d'erreurs et conduit à des calculs trigonométriques complexes avec cumul des erreurs. La
25 fonction de transfert entre les informations brutes et les coordonnées réelles est ainsi approximative. De plus, pour obtenir les coordonnées absolues des points de la surface, il faut définir à tous moments les caractéristiques de position de l'ensemble-capteur (mobile) par rapport au référentiel
30 absolu lié au bâti et les systèmes d'acquisition connus ne peuvent effectuer ce passage que pour des mouvements simples des actionneurs, correspondant à des déplacements relatifs de l'ensemble-capteur simples et parfaitement définis (rotation ou translation unique de l'ensemble-capteur par rapport à
35 l'objet). Cette limitation appauvrit le champ des mesures que le système peut effectuer, et ceci peut être un inconvénient majeur pour des objets de forme complexe.

L'invention se propose de fournir un nouveau procédé d'étalonnage permettant de s'affranchir des défauts
40 sus-évoqués des systèmes connus d'acquisition de forme.

3.

Un objectif de l'invention est en particulier de fournir un étalonnage indépendant de la structure interne de l'ensemble-capteur et qui, par conséquent, n'exige pas une mesure préalable physique des paramètres géométriques de celle-ci.

Un autre objectif est de permettre un passage au référentiel absolu lié au bâti, sans avoir à connaître les caractéristiques de fixation ou de bridage de l'ensemble-capteur sur le terminal mobile qui le porte.

L'invention vise ainsi à élargir les mouvements possibles du système, l'ensemble-capteur pouvant être embarqué (de façon non connue en soi) sur n'importe quel organe terminal mobile (robot, machine-outil...) dont la cinématique est elle-même prédéfinie.

A cet effet, le procédé d'étalonnage d'un système d'acquisition de forme du type défini précédemment, en vue d'établir la fonction de transfert globale entre les échos renvoyés et les coordonnées absolues correspondantes (x,y,z), que doit délivrer le système d'acquisition, consiste :

- . à mémoriser préalablement des informations de définition géométrique, relatives à une mire de calibration présentant des reliefs de géométrie et dimensions connues,

- . à réaliser l'acquisition de la forme de ladite mire de calibration au moyen de l'ensemble-capteur disposé dans une position déterminée par rapport à ladite mire, dite position de calibration, en vue de mémoriser les informations brutes (p, q...) correspondantes représentatives de l'écho de la mire capté par ledit ensemble-capteur,

- . à transposer, pour la position de calibration précitée, les informations de définition de la mire de calibration sous la forme de coordonnées (u,v,w) dans un référentiel lié au capteur dit référentiel capteur (U,V,W),

- . à calculer, à partir des résultats de l'acquisition précitée et des coordonnées (u,v,w) caractéristiques de la mire dans le référentiel capteur, une fonction de transfert intermédiaire :

$$\begin{aligned} & (\quad u = F(p,q...) \\ N & \quad (\quad v = G(p,q...) \\ 40 & \quad (\quad w = H(p,q...) \end{aligned}$$

donnant les coordonnées (u,v,w) dans le référentiel capteur (U,V,W) en fonction des informations brutes (p,q) ,

. à définir la position du référentiel capteur (U,V,W) dans le référentiel terminal (R,S,T) en vue de mémoriser une matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal,

. à composer la fonction de transfert intermédiaire N avec, d'une part, la matrice de passage M_{TC} , d'autre part, la matrice de passage M_{AT} , en vue d'obtenir la fonction de transfert globale $L = M_{AT} \cdot M_{TC} \cdot N$

Ainsi, dans le procédé de l'invention, on remplace la connaissance des paramètres géométriques de l'ensemble-capteur (qui sont difficiles et imprécis à mesurer) par celle d'une mire de calibration simple et facile à coter de façon précise. L'établissement de la fonction de transfert intermédiaire s'effectue directement par une acquisition d'informations brutes dans les mêmes conditions que les mesures ultérieures des points d'un objet, de sorte que l'on supprime ainsi les cumuls d'erreurs (puisque les erreurs de la mesure réelle sont compensées par celles, identiques, réalisées lors de l'acquisition de la mire de calibration).

La mire de calibration peut en particulier être très simplement constituée par une plaque portant sur une face un maillage de piqués : les informations de définition de la mire se ramènent alors aux coordonnées (u_k, v_k) de chaque piqué dans un référentiel mire (U,V) contenu dans le plan de la face de la mire portant le maillage de piqués.

Dans le cas d'un maillage carré, une seule information suffit, à savoir le pas de la maille.

Par ailleurs, selon un premier mode de mise en oeuvre, la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur (U,V,W) au référentiel terminal est définie :

. en fixant la mire de calibration sur le bâti fixe dans une position prédéterminée connue et en mémorisant les données correspondantes,

. en définissant et mémorisant, à partir de ces données, une matrice M_{AC} de passage du référentiel capteur (U,V,W) au référentiel absolu (X,Y,Z) pour la position de calibration,

5

. en mémorisant la matrice M_{AT} délivrée par les moyens de détermination dans la position de calibration, matrice notée M_{AT0} ,

5 . et en calculant la matrice M_{TC} à partir des matrices précitées : $M_{TC} = (M_{AT0})^{-1} \cdot M_{AC}$

Ainsi dans ce mode de mise en oeuvre, la référence absolue est donnée par une fixation précise et parfaitement connue de la mire de calibration sur le bâti,
10 fixation qui peut être garantie sans difficulté par des positionnements mécaniques connus.

Toutefois, cette contrainte de fixation précise de la mire peut être évitée en mettant en oeuvre une autre procédure de définition de la matrice M_{TC} consistant :

15 . à réaliser l'acquisition d'au moins un point caractéristique d'une mire de référence dans $-P$ positions de l'ensemble-capteur, en vue d'acquérir les informations brutes ($p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_p, q_p$) représentatives des échos correspondants,

20 . à calculer au moyen de la fonction de transfert intermédiaire (V) les coordonnées correspondantes ($u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_p, v_p, w_p$) dans le référentiel-capteur,

. à mémoriser les matrices ($M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{ATp}$) délivrées pour chacune des positions d'acquisition par les moyens de détermination,

. à résoudre le système d'équations suivants en vue de calculer l'inconnue M_{TC} :

$$30 \quad \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ATk} \end{bmatrix} \cdot M_{TC} \quad \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq P$$

où $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ sont les coordonnées inconnues du point
35

caractéristique de la mire, éliminées par substitution dans la résolution du système d'équations.

Il est à noter que la mire de référence peut
40 être constituée par la mire de calibration elle-même dont

certaines pines servent de points de référence.

Dans ce mode de mise en oeuvre, la connaissance du positionnement mécanique de la mire est
5 remplacée par une série d'acquisitions de points caractéristiques, effectuées dans des positions différentes obtenues par le mouvement des actionneurs, dans les mêmes conditions que sont effectuées les mesures réelles sur un objet : ce positionnement quelconque de la mire donne une
10 souplesse plus grande au procédé (système d'acquisition transportable, possibilité de lier la mire à l'objet à mesurer...).

Dans le cas d'un système d'acquisition dans lequel l'ensemble-capteur comprend un système d'éclairage apte
15 à émettre au moins un faisceau lumineux lamellaire vers l'objet et un dispositif vidéo apte à filmer l'objet avec une parallaxe constante par rapport aux faisceaux du système d'éclairage en vue de délivrer des informations brutes (p,q) fonction des colonnes (p) et lignes (q) des images des points
20 de la trace de chaque faisceau sur l'objet ou la mire de calibration, la fonction de transfert intermédiaire N peut être exprimée sous forme linéaire, ou sous forme non linéaire de développement limité, ou encore en divisant la mire de calibration en zones élémentaires traitées de façon linéaire
25 ou non, ou encore en effectuant une correction des distorsions du système au moyen d'une table de linéarisation.

La forme linéaire est suffisante lorsque les focales des dispositifs vidéo sont suffisamment grandes pour limiter les aberrations optiques. La forme non linéaire permet
30 de prendre en compte des dispositifs vidéo présentant des distorsions importantes ou des optiques avec anamorphose.

Si ces distorsions sont faciles à caractériser ou fournies par construction, les corrections par table de linéarisation seront préférables.

35 Pour certaines applications ne nécessitant pas une compensation fine des non-linéarités, la division par zones élémentaires représente un bon compromis précision/simplicité de calcul.

Pour limiter lors des mesures d'étalonnage
40 l'erreur de quantification due à la résolution de l'ensemble-

capteur, le calcul de la fonction de transfert intermédiaire (N) et le calcul de la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal s'effectuent de préférence
 5 en établissant des systèmes d'équations redondants et en les résolvant au sens des moindres carrés.

L'invention s'étend à un système d'acquisition du type précédemment défini, doté de moyens d'étalonnage permettant la mise en oeuvre du procédé sus-
 10 visé :

- une mire de calibration présentant des reliefs de géométrie et dimensions connues,
- des moyens de fixation de la mire de calibration sur le bâti,
- 15 - des moyens de mémorisation comprenant une zone-mémoire pour les informations de définition géométrique relatives à la mire de calibration et une zone-mémoire pour la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal,
- 20 - et un calculateur adapté et programmé pour réaliser la transposition en coordonnées des informations de définition géométrique, pour calculer la fonction de transfert intermédiaire (N), et pour calculer par composition la fonction de transfert globale (L).

25 Dans le cas d'un étalonnage où la matrice M_{TC} est calculée à partir des informations de position de la mire de calibration, le système présente en outre les caractéristiques suivantes :

. les moyens de fixation de la mire de
 30 calibration sont adaptés pour assurer la fixation de ladite mire dans une position prédéterminée connue par rapport au bâti,

. les moyens de mémorisation comprennent une zone-mémoire pour les données de position correspondantes de
 35 ladite mire, et une zone-mémoire pour la matrice (M_{AC}) de passage du référentiel capteur au référentiel absolu,

. le calculateur est adapté et programmé pour définir la matrice (M_{AC}) et pour calculer la matrice M_{TC} à partir des matrices M_{AC} et M_{ATD} .

40 Dans le cas d'un étalonnage où la matrice M_{TC}

est calculée à partir de différentes positions de l'organe terminal, le système présente les caractéristiques suivantes :

- . l'edit système comprend une mire de
5 référence présentant au moins un point caractéristique et des
moyens de fixation de la mire de référence sur le bâti, ..
- . les moyens de mémorisation comprennent une
zone-mémoire pour les matrices $M_{AT1} \dots M_{ATp}$,
- . le calculateur est adapté et programmé pour
10 résoudre le système d'équations en M_{TC} .

D'autres caractéristiques, buts et avantages de l'invention ressortiront de la description qui suit en référence aux dessins annexés, lesquels illustrent à titre d'exemples non limitatifs des modes de mise en oeuvre du
15 procédé d'étalonnage de l'invention et un mode de réalisation
d'un système d'acquisition. Sur ces dessins qui font partie
intégrante de la présente description :

- la figure 1 est une vue en perspective d'un
système d'acquisition conforme à l'invention en l'exemple d'un
20 robot 6 axes,
- la figure 2 est une vue de détail en coupe
partielle de l'ensemble-capteur fixé sur l'organe terminal
dudit système,
- la figure 3 est un synoptique général de
25 fonctionnement du système d'acquisition en mode mesure,
- la figure 4 est une vue en perspective du
robot en cours d'étalonnage (procédure de calibration),
- la figure 5a est un logigramme illustrant
le logiciel de calcul dans le cas d'une fonction de transfert
30 intermédiaire linéaire, et la figure 5b est une illustration
dans ce cas de l'écho de la mire de calibration,
- la figure 6 explicite l'algorithme de
transposition, élaboration des équations et résolution dans le
cas linéaire de la figure 5a,
- 35 - la figure 7a est un logigramme illustrant
le logiciel de calcul dans le cas d'une fonction intermédiaire
non linéaire, et la figure 7b est une illustration de l'écho,
- les figures 8a et 8b sont des
représentations similaires dans le cas d'une fonction de
40 transfert intermédiaire défini par zones élémentaires,

- les figures 9a, 9c sont des représentations similaires dans le cas d'une fonction de transfert intermédiaire corrigée par table de linéarisation, la figure 5 9b représentant l'écho non corrigé,

- la figure 10 est une vue en perspective partielle du système en cours d'étalonnage (procédure de prise de référence) avec représentation des échos en cours de procédure,

10 - la figure 11 est un logigramme illustrant le logiciel de résolution du système d'équations en HTC ,

- la figure 12 est un schéma illustrant la modélisation de la chaîne cinématique du robot, représentée par la matrice A_T de passage du référentiel terminal au 15 référentiel absolu.

Le système d'acquisition de forme représenté à titre d'exemple aux figures 1 et 2 comprend sept ensembles essentiels :

- un bâti fixe 1,
20 - un robot six axes 2 solidaire du bâti fixe et pourvu d'un organe terminal 2a,
- un ensemble-capteur 3 porté par l'organe terminal 2a,

- une mire de calibration 4 elle-même 25 solidaire du bâti fixe 1 et qui, en l'exemple, fait également office de mire de référence comme on le verra plus loin,

- un calculateur 5,
- des moyens de mémorisation 6 associés au calculateur 5,

30 - et une interface électronique 7 entre l'ensemble robot/capteur et le calculateur.

Le robot 2 est en lui-même de type classique, comprenant un jeu d'actionneurs constitué par une chaîne cinématique de moteurs, en l'exemple au nombre de six : 8, 9, 35 10, 11, 12 et 13, permettant six rotations autour de six axes-moteurs. Chaque moteur est associé à un capteur de position angulaire notamment de type incrémental tel que capteur 18, qui délivre des impulsions représentatives de la rotation du moteur visé. Le moteur 8 est solidaire du bâti auquel est lié 40 un référentiel dit absolu (X, Y, Z) par rapport auquel le

système exprime les coordonnées des points de la forme à acquérir, cependant que le moteur 13 porte l'organe terminal 2a du robot auquel est lié un référentiel dit 5 terminal (R, S, T) dont l'axe R est confondu avec l'axe de ce moteur.

L'ensemble capteur 3 comprend un système d'éclairage 14 et un dispositif vidéo 15. Le système d'éclairage 14 est en l'exemple constitué par un tube laser 10 hélium-néon basse puissance 14a associé à une optique cylindrique 14b et un miroir de renvoi 14c afin d'émettre un faisceau lamellaire FL. Le système d'éclairage 14 est monté sur l'organe terminal par un mandrin à haïonnette 16 et est doté de moyens de réglage 17 permettant d'ajuster la position 15 du faisceau lamellaire. En l'exemple, la position de ce faisceau est réglée pour que celui-ci coïncide avec le plan RT du référentiel terminal (R, S, T).

Le dispositif vidéo 15 comprend une caméra vidéo C.C.D. 15a dont le boîtier est articulé par une 20 charnière 15b sur le système d'éclairage 14, de façon que l'axe optique AO de prise de vue présente une parallaxe constante PAR par rapport au faisceau lumineux FL et que la caméra ait un champ lui permettant de filmer la trace laser sur l'objet éclairé. La caméra 15a est équipée d'un 25 objectif 15c muni d'un filtre interférentiel accordé sur la longueur d'onde du faisceau lumineux.

La caméra 15 délivre un signal vidéo vers l'interface électronique 7. Cette dernière est dotée d'une carte d'acquisition 7a qui, à partir du signal vidéo, engendre 30 et mémorise dans une zone-mémoire 6d des informations brutes (p, q) représentatives des échos captés par la caméra, c'est-à-dire de l'image de la trace du faisceau lumineux FL sur l'objet examiné. Cette carte est en elle-même connue et peut être du type décrit dans le brevet FR 2.519.138 ; elle délivre 35 vers le calculateur 5 des informations (p, q) fonction des colonnes (p) et lignes (q) des images des points de la trace.

Le calculateur 5 possède un module 5b de commande de trajectoire qui, par l'entremise d'un amplificateur de puissance 7b de l'interface 7, commande les 40 rotations des moteurs 8-13 du robot et donc la position et

l'orientation de l'organe terminal 2a par rapport au bâti 1.

L'interface comprend, en outre, des moyens de comptage 7c des signaux issus des capteurs 18 qui délivrent
5 vers le calculateur des informations représentatives de la position des moteurs. Les moyens de mémorisation 6 comprennent une zone-mémoire 6a dans laquelle sont stockées des données relatives à l'agencement mécanique du robot (longueur des bras, agencement angulaire des axes de moteurs,
10 fins de course...). Le calculateur 5 comprend un module de calcul 5a programmé pour engendrer, à chaque instant, à partir des informations issues des moyens de comptage 7c et des informations stockées dans la zone-mémoire 6a, une matrice M_{AT} de passage du référentiel terminal (R, S, T) au référentiel
15 absolu. Cette procédure robotique et les calculs matriciels correspondants sont eux-mêmes connus et ne seront pas davantage détaillés. Cette matrice est stockée dans une autre zone-mémoire 6b des moyens de mémorisation.

Les capteurs de position angulaire 18, les
20 moyens de comptage 7c, les zones-mémoires 6a et 6b et le module de calcul 5a sont désignés de la façon habituelle sous l'expression générique : moyens de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe dont la finalité est d'engendrer et de mémoriser la
25 matrice M_{AT} précitée.

La mire de calibration 4 présente des reliefs de géométrie et de dimensions connues, préalablement mémorisées dans une zone-mémoire 6c des moyens de mémorisation. En l'exemple, cette mire est une plaque 4a
30 portant sur une face un maillage de piques 4b, chacune constituée par un téton cylindrique. En l'exemple où la mire sert également de mire de référence, certaines piques servent de points caractéristiques dans la procédure de prise de référence qui sera décrite plus loin. Il est possible de
35 prévoir entre 9 et 25 piques selon les applications envisagées, les piques centrales (entre 3 et 9) servant de points de référence caractéristiques.

La mire de calibration 4 est fixée sur le bâti 1 à l'aide de moyens de fixation, tel que socle de
40 mire 4c boulonné sur ledit bâti, en position telle que le

faisceau lumineux lamellaire de l'ensemble-capteur 3 puisse être positionné parallèlement au plan de la plaque 4a de mire, de façon à intercepter les piques 4b de celle-ci. Pour la
 5 procédure de calibration qui est la première étape du procédé d'étalonnage, un référentiel dit référentiel capteur (U, V, W) est lié au faisceau lamellaire pour avoir une position prédéterminée par rapport à la mire dans cette position de calibration.

10 Dans l'exemple visé, la mire de calibration est fixée sur le bâti dans une position fixe mais qui n'a pas à être connue de façon précise, en raison de la procédure de prise de référence qui est mise en oeuvre comme visé plus loin. Il est à noter que, dans un autre mode de mise en oeuvre
 15 du procédé d'étalonnage, cette procédure de prise de référence ne peut être supprimée au prix d'une fixation précise et connue de la mire de calibration sur le bâti comme on le verra plus loin.

La figure 3 est un synoptique montrant le
 20 déroulement d'une mesure après étalonnage du système. Le procédé d'étalonnage permet :

- . par l'entremise de moyens de calibration 19 d'élaborer et de mémoriser dans une mémoire 5c du calculateur une fonction de transfert intermédiaire N consistant à une
 25 opération programmée contenue dans ledit calculateur,

- . par l'entremise de moyens de prise de référence 20, d'élaborer et de mémoriser dans une mémoire 5d du calculateur une matrice M_{TC} de passage du référentiel capteur (U, V, W) au référentiel terminal (R, S, T),

30 . le cas échéant, par des moyens de caractérisation mécanique 21, d'élaborer et de mémoriser dans une mémoire 5e du calculateur une matrice COR de correction des défauts mécaniques.

La mesure d'un objet, c'est-à-dire
 35 l'acquisition des coordonnées de différents points de sa surface, s'effectue par le processus suivant :

- . programmation d'une trajectoire du robot par le module de commande 5h en vue d'éclairer la surface de l'objet à acquérir,

40 . exécution par les moteurs 8-13 des

mouvements correspondants,

. pour chaque position de la trajectoire, stockage des informations brutes captées (p, q) dans la
5 mémoire 6d,

. mémorisation dans la zone-mémoire 6h de la matrice M_{AT} engendrée par les moyens de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe,

10 . application sur les informations brutes (p, q) de la fonction de transfert intermédiaire N pour obtenir les coordonnées (u, v, w) du point correspondant de l'objet dans le référentiel capteur (U, V, W),

. application de la matrice de passage M_{TC}
15 sur ces coordonnées (u, v, w) pour obtenir les coordonnées correspondantes (r, s, t) dans le référentiel terminal (R, S, T),

. application de la matrice de passage M_{AT} sur ces coordonnées (r, s, t) pour obtenir les coordonnées
20 correspondantes (x, y, z) dans le référentiel absolu (X, Y, Z),

. le cas échéant, correction de ces coordonnées (x, y, z) par application de la matrice de correction CPR.

25 La description qui suit illustre le procédé d'étalonnage par le système décrit, procédé qui peut se scinder en trois étapes : calibration, prise de référence, caractérisation.

Cette dernière étape connue en elle-même dans
30 le domaine de la robotique consiste à relever les imperfections des organes mécaniques du robot au cours des mouvements, au moyen d'instruments de mesure métrologique appropriés (inclinomètres, comparateurs, lunettes, théodolites...), en vue de définir les coefficients de
35 correction pour compenser ces imperfections.

La figure 4 montre le système en cours de calibration dans une position dite de calibration, cependant que les figures 5a et 6 illustrent la chaîne logicielle et l'algorithme de calcul dans le cas de la calibration linéaire.
40 Le faisceau lamellaire FL parallèle à la plaque 4a intercepte

les piques 4b et la caméra réalise l'acquisition desdites piques et délivre des informations brutes (p, q) (lignes et colonnes des échos correspondants) qui sont supposées visualisées sur un moniteur 22 de contrôle caméra. Ces informations brutes sont mémorisées dans la zone-mémoire 6d.

Le référentiel capteur (U, V, W) ayant une position connue par rapport à la mire pour cette position de calibration, on transpose les informations de définition de la mire contenue dans la zone-mémoire 6c (pas du maillage entre piques) en coordonnées (u, v, w) de chaque pique dans le référentiel capteur (U, V, W). En pratique, l'on peut choisir un référentiel capteur qui passe par la pique centrale et dont deux axes sont parallèles aux alignements des piques et l'autre axe perpendiculaire. Cette transposition est effectuée par le calculateur 5 qui est programmé à cet effet.

Dans le cas décrit de la calibration linéaire, on choisit une forme de fonction de transfert intermédiaire :

$$\begin{aligned} 20 \quad (\quad u &= F(p, q) = \frac{ap + bq + c}{gp + hq + 1} \\ (\quad v &= G(p, q) = \frac{dp + eq + f}{gp + hq + 1} \\ 25 \quad (\quad w &= n \end{aligned}$$

les coefficients (a-h) étant déterminés en appliquant ces équations à au moins quatre points des reliefs de la mire, pour lesquels le quadruplet (u, v, p, q) est connu et mémorisé, et en résolvant le système linéaire d'équations obtenu qui est appliqué à P piques (indice courant : k) et fournit le système d'équations linéaire suivant :

$$(ap_k + bq_k + c + 0 + 0 + 0 - gu_kp_k - hu_kq_k = u_k \\ 1 \leq k \leq P)$$

$$(0 + 0 + 0 + dp_k + eq_k + f - gv_kp_k - hv_kq_k = v_k$$

qui peut s'écrire globalement sous forme matricielle :

$$35 \quad HX = Y$$

où X est le vecteur inconnu a, b, c, d, e, f, g, h définissant la fonction de transfert intermédiaire N et où H est un tableau de dimension : 8 lignes par 2 P colonnes.

La solution au moindre carré est donnée par :

$$40 \quad X = (I_{H.H})^{-1} \cdot I_{H.Y}$$

Le logigramme de la figure 6 illustre la constitution du système d'équations et sa résolution.

Le nombre de piques est choisi supérieur à 5 $P = 4$ notamment $9 < P < 25$ de façon à fournir des redondances et à permettre de s'affranchir des erreurs de quantification sur p_k et q_k liées à la résolution de la caméra et à l'échantillonnage de l'acquisition.

La figure 5h est une visualisation de la fonction de transfert intermédiaire sous forme $u = Cste$ et $v = Cste$ dans l'espace (p, q) .

Les figures 7a, 8a et 9a illustrent la chaîne de calcul dans le cas de trois autres formes de fonction de transfert intermédiaires : non linéaire, définie par zones élémentaires, corrigée par table ; les figures 7b, 8b, 9b et 9c sont une visualisation de ces fonctions de transfert intermédiaires.

Dans le cas de la figure 7a d'un système non linéaire (aberration optique de la caméra, distorsion vidéo...), on considère que la formulation linéaire précédente est valable localement et que les coefficients $a - h$ sont fonctions du point (p, n) ; la fonction de transfert intermédiaire est alors choisie de la forme :

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{ij=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q) \right) \\
 5 \quad & \left(u = F(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q)} \right) \\
 & \left(\sum_{ij=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q) \right) \\
 10 \quad & \left(v = G(p, q) = \frac{\sum_{ij=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q)}{1 + \sum_{ij=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot q_j(q)} \right) \\
 & \left(w = 0 \right)
 \end{aligned}$$

les fonctions f_i , q_j étant une base de développement limité, les coefficients (α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij}) étant déterminés en appliquant ces équations à un nombre de points de reliefs de la mire, au moins égal à $1 + \frac{3n(n+3)}{4}$, pour lesquels le

quadruplet (u, v, p, q) est connu et mémorisé, et en résolvant le système linéaire d'équations obtenu.

Les non-linéarités des coefficients représentent de faibles variations (quelques pourcent) de la fonction de transfert et ces coefficients peuvent donc être exprimés sous la forme de développement limité.

Les bases de développement f_i , q_j peuvent être polynomiales $f_i(p_k) = p_k^i$, $q_j(q_k) = q_k^j$.

Elles peuvent également être exponentielles : $f_i(p_k) = e^{i \cdot p_k}$, $q_j(q_k) = e^{j \cdot q_k}$.

En substituant ces développements dans les fonctions F , G et en factorisant par rapport aux coefficients α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} , on obtient un système d'équations linéaires

en α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij} ayant un nombre d'inconnues fonction du degré n du développement.

Ce système peut également être résolu aux 5 moindres carrés en choisissant un nombre de pîges redondant.

La figure 7b illustre la fonction de transfert intermédiaire ainsi définie, qui correspond à des courbes non rectilignes $u = \text{Cste}$, $v = \text{Cst}$ dans l'espace p , q , apte à épouser au plus près le maillage des pîges malgré la 10 non-linéarité du système.

La figure 8a illustre une autre chaîne de calcul dans laquelle on calcule la fonction de transfert intermédiaire N , en divisant la mire de calibration en n zones élémentaires et en calculant pour chaque zone élémentaire (e) 15 une fonction de transfert élémentaire N_e , la fonction de transfert intermédiaire N étant constituée pour l'ensemble de ces fonctions élémentaires appliquées sur leurs zones élémentaires respectives. La chaîne est analogue à celle du calcul de calibration prédéfini, mais avec une boucle de 20 calcul pour chaque zone. Cette procédure est utilisable pour de faibles non-linéarités permettant de définir un nombre modéré de zones pratiquement linéaires (par exemple 16 zones).

La figure 8b montre le raccordement des fonctions de transfert pour les diverses zones sous la forme 25 $u = \text{Cste}$, $v = \text{Cste}$ dans l'espace (p, q) .

La figure 9a illustre une autre chaîne de calcul dans laquelle on calcule la fonction de transfert intermédiaire N :

- . en mémorisant préalablement une table de 30 linéarisation $p'(p, q)$, $q'(p, q)$ caractérisant les distorsions du système d'acquisition,

- . en corriqueant préalablement les informations brutes (p, q) au moyen de ladite table de linéarisation, en vue d'obtenir des informations corrigées p' , 35 q' ,

- . en calculant la fonction de transfert N sous la forme linéaire, conformément à la revendication 4 :

$$\begin{aligned}
 (\quad u &= F(p, q) = \frac{ap' + bq' + c}{qp' + hq' + i} \\
 (\quad & \\
 5 \quad (\quad & \\
 \wedge (\quad v &= G(p, q) = \frac{dp' + eq' + f}{qp' + hq' + i} \\
 (\quad & \\
 (\quad & \\
 (\quad w &= 0
 \end{aligned}$$

10 La table de linéarisation est établie par mesure directe des distorsions du système : distorsion optique, électronique et contient des coefficients rectificatifs à appliquer aux informations brutes p, q pour obtenir les informations corrigées p', q' . Le système
15 d'équations est ensuite établi et résolu comme dans le cas linéaire.

La figure 9b illustre la fonction de transfert intermédiaire linéaire sans appliquer la rectification et la figure 9c illustre cette fonction corrigée
20 (sous la forme $u = Cst, v = Cste$ dans l'espace (p', q')).

Le procédé d'étalonnage consiste ensuite à définir la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal afin de la composer à la fonction de transfert intermédiaire N , calculée comme ci-dessus défini.

25 Cette définition de M_{TC} est obtenue par l'étape de prise de référence qui est illustrée à la figure 10, avec les images correspondantes apparaissant sur le moniteur de contrôle 22 ; cette étape de prise de référence consiste :

30 . à réaliser l'acquisition d'au moins un point caractéristique d'une mire de référence dans $-P$ -positions de l'ensemble-capteur, en vue d'acquérir les informations brutes $(p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_1, q_1)$ représentatives des échos correspondants,

35 . à calculer au moyen de la fonction de transfert intermédiaire (N) les coordonnées correspondantes $(u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_1, v_1, w_1)$ dans le référentiel-capteur,

. à mémoriser les matrices $(M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{AT1})$ délivrées pour chacune des positions d'acquisition par
40

les moyens de détermination,

. à résoudre le système d'équations suivants
en vue de calculer l'inconnu H_{TC} :

$$5 \quad \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{ATk} \end{bmatrix} \cdot H_{TC} \quad \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq p$$

10 où $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ sont les coordonnées inconnues du point

caractéristique de la mire, éliminées par substitution dans la
résolution du système d'équations.

Comme déjà indiqué, 9 piques de la mire
15 peuvent servir de points caractéristiques de référence en vue
d'obtenir un calcul redondant.

Selon un mode de mise en oeuvre préféré, les
-2- positions de l'ensemble-capteur sont engendrées d'une
part, par une rotation en pas à pas de l'organe terminal
20 autour de l'origine du référentiel terminal (R, S, T), d'autre
part, par une translation en pas à pas parallèle à un axe
connu lié audit référentiel terminal (R, S, T), de sorte que
la matrice H_{TC} soit constituée par la position de l'origine du
référentiel terminal dans le référentiel capteur (U, V, W) et
25 par l'orientation dudit référentiel terminal dans le
référentiel capteur, la résolution du système d'équations
précité étant effectué en le scindant en deux sous-systèmes
indépendants, l'un utilisant les points fournis par la
rotation et donnant la position de l'origine précitée, l'autre
30 utilisant les points fournis par la translation et donnant
l'orientation du référentiel terminal (R, S, T).

Lors de la rotation, les piques décrivent dans
le référentiel capteur (U, V, W) des arcs de cercle centrés
sur l'origine du référentiel terminal (coordonnée u_0, v_0, w_0)
35 qui est ainsi calculé en recherchant le centre au sens des
moindres carrés de ces arcs de cercle.

Lors de la translation, les piques décrivent
dans le référentiel capteur (U, V, W) des segments de droite
parallèles à la direction du déplacement du référentiel
40 terminal (R, S, T) dont l'orientation est ainsi calculée au

20

sens des moindres carrés dans le référentiel capteur, sous forme des cosinus directeurs ($R_U, R_V, R_W ; S_U, S_V, S_W ; T_U, T_V, T_W$) des vecteurs R, S, T .

5 La matrice M_{TC} s'exprime alors sous la forme homogène suivante :

$$10 \quad M_{TC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_0 & R_U & S_U & T_U \\ v_0 & R_V & S_V & T_V \\ w_0 & R_W & S_W & T_W \end{bmatrix}$$

La chaîne de calcul de cette matrice M_{TC} est illustrée à la figure 11.

Par ailleurs, la matrice M_{AT} de passage du référentiel terminal (R, S, T) au référentiel absolu (X, Y, Z)
15 est calculée par le module 5a du calculateur à partir des informations de position fournies par l'interface 7c et des informations de définition de la chaîne cinématique issues de la zone-mémoire 6a. Ce calcul classique en soi en robotique est illustré à la figure 12. Si l'on considère que le
20 $(n+1)^{ième}$ moteur est attaché au $n^{ième}$ moteur, le passage du référentiel $n+1$ (supposé attaché au $n+1^{ième}$ moteur) au référentiel n est exprimé par la matrice

$$M_{n, n+1} = \begin{bmatrix} P_{n, n+1} \\ B_{n, n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{NT n+1} \end{bmatrix}$$

25 $B_{n, n+1}$ est une matrice constante de construction du robot, définie à partir des informations de définition de la chaîne cinématique, issues de la zone-mémoire 6a.

$M_{NT n+1}$ est une matrice variable dépendant de la position de $n+1$ moteur par rapport à une position
30 initiale de son capteur 18 et définie par les informations de positions issues de l'interface 7c.

Comme l'illustre la figure 12, dans le cas de six moteurs, on a :

$M_{AT} = M_{0,1} \cdot M_{1,2} \cdot M_{2,3} \cdot M_{3,4} \cdot M_{4,5} \cdot M_{5,6}$ la matrice $M_{0,1}$ étant la
35 matrice de passage du premier moteur 8 au référentiel bâti (X, Y, Z), cependant que la matrice $M_{5,6}$ est la matrice de passage du référentiel terminal (R, S, T) au moteur 5.

REVENDEICATIONS

- 1/ - Procédé d'étalonnage d'un système d'acquisition de forme, apte à délivrer les coordonnées (x, y, z) représentatives de la forme d'un objet tridimensionnel dans un référentiel dit absolu (X, Y, Z), ledit système d'acquisition comprenant un bâti fixe auquel est lié le référentiel absolu, un organe terminal mobile auquel est lié un référentiel dit terminal (R, S, T), un jeu d'actionneurs adapté pour mouvoir l'organe terminal par rapport au bâti fixe, des moyens (18, 7c, 6a, 6b, 5a) de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe apte à mémoriser une matrice M_{AT} de passage du référentiel terminal (R, S, T) au référentiel absolu (X, Y, Z), un ensemble-capteur porté par l'organe terminal et adapté pour émettre vers l'objet tridimensionnel une onde structurée et pour capter l'écho renvoyé par ledit objet, et des moyens de stockage des informations issues de l'ensemble-capteur dites informations brutes représentatives des échos captés, ledit procédé d'étalonnage permettant de définir la fonction de transfert globale (L) entre tout écho renvoyé et les coordonnées absolues correspondantes (x, y, z) appelées à être délivrées par le système d'acquisition, et étant caractérisé en ce qu'il consiste :
- 25 . à mémoriser préalablement des informations de définition géométrique, relatives à une mire de calibration présentant des reliefs de géométrie et dimensions connues,
 - . à réaliser l'acquisition de la forme de ladite mire de calibration au moyen de l'ensemble-capteur
 - 30 disposé dans une position déterminée par rapport à ladite mire, dite position de calibration, en vue de mémoriser les informations brutes (p, q...) correspondantes représentatives de l'écho de la mire capté par ledit ensemble-capteur,
 - . à transposer, pour la position de
 - 35 calibration précitée, les informations de définition de la mire de calibration sous la forme de coordonnées (u, v, w) dans un référentiel lié au capteur dit référentiel capteur (U, V, W),
 - . à calculer, à partir des résultats de
 - 40 l'acquisition précitée et des coordonnées (u, v, w)

caractéristiques de la mire dans le référentiel capteur, une fonction de transfert intermédiaire :

$$\begin{aligned} 5 \quad & (\quad u = F(p, q, \dots) \\ & \backslash \quad (\quad v = G(p, q, \dots) \\ & \quad (\quad w = H(p, q, \dots) \end{aligned}$$

donnant les coordonnées (u, v, w) dans le référentiel capteur (U, V, W) en fonction des informations brutes (p, q) ,

10 . à définir la position du référentiel capteur (U, V, W) dans le référentiel terminal (R, S, T) en vue de mémoriser une matrice (H_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal,

 . à composer la fonction de transfert
15 intermédiaire N avec, d'une part, la matrice de passage H_{TC} , d'autre part, la matrice de passage H_{AT} , en vue d'obtenir la fonction de transfert globale $L = H_{AT} \cdot H_{TC} \cdot N$

2/ - Procédé d'étalonnage selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'on utilise une mire
20 de calibration comprenant une plaque portant sur une face un maillage de piques, et l'on mémorise comme informations de définition les coordonnées (u_k, v_k) de chaque pique de la mire dans un référentiel mire (U, V) contenu dans le plan de la face de la mire portant le maillage de piques.

25 3/ - Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, pour l'étalonnage d'un système d'acquisition, dans lequel l'ensemble-capteur comprend un système d'éclairage apte à émettre au moins un faisceau lumineux lamellaire vers l'objet et un dispositif vidéo apte à filmer l'objet avec une
30 parallaxe constante par rapport aux faisceaux du système d'éclairage en vue de délivrer des informations brutes (p, q) fonction des colonnes (p) et lignes (q) des images des points de la trace de chaque faisceau sur l'objet ou la mire de calibration.

35 4/ - Procédé d'étalonnage selon les revendications 2 et 3 prises ensemble, caractérisé en ce que l'on calcule une fonction de transfert intermédiaire N de la forme linéaire suivante :

$$\begin{array}{rcl}
 & & 23 \\
 (& u = F(p, q) = & \frac{ap + bq + c}{qp + bq + 1} \\
 (& & \\
 N & (& v = G(p, q) = \frac{dp + eq + f}{qp + bq + 1} \\
 5 & (& \\
 & (& w = 0
 \end{array}$$

les coefficients (a-h) étant déterminés en appliquant ces équations à au moins quatre points des reliefs de la mire, pour lesquels le quadruplet (u, v, p, q) est connu et 10 mémorisé, et en résolvant le système linéaire d'équations obtenu.

5/ - Procédé d'étalonnage selon les revendications 2 et 3 prises ensemble, caractérisé en ce que l'on calcule une fonction de transfert intermédiaire N non linéaire de la forme :

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i,j=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q) \\
 & u = F(p, q) = \frac{\sum_{i,j=0}^n \alpha_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\
 & \sum_{i,j=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q) \\
 & v = G(p, q) = \frac{\sum_{i,j=0}^n \beta_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)}{1 + \sum_{i,j=1}^n \gamma_{ij} f_i(p) \cdot g_j(q)} \\
 & w = 0
 \end{aligned}$$

35 les fonctions f_i , g_j étant une base de développement limité,
les coefficients (α_{ij} , β_{ij} , γ_{ij}) étant déterminés en
appliquant ces équations à un nombre de points de reliefs de
la mire, au moins égal à $1 + \frac{3n(n+3)}{2}$, pour lesquels le

4ⁿ quadruplet (u, v, p, q) est connu et mémorisé, et en résolvant :

le système linéaire d'équations obtenu.

6/ - Procédé d'étalonnage selon les revendications 2 et 3 prises ensemble, caractérisé en ce que
 5 l'on calcule la fonction de transfert intermédiaire N , en divisant la mire de calibration en n zones élémentaires et en calculant pour chaque zone élémentaire (e) une fonction de transfert élémentaire N_e conformément à l'une des revendications 4 ou 5, la fonction de transfert intermédiaire
 10 N étant constituée pour l'ensemble de ces fonctions élémentaires appliquées sur leurs zones élémentaires respectives.

7/ - Procédé d'étalonnage selon les revendications 2 et 3 prises ensemble, caractérisé en ce que
 15 l'on calcule la fonction de transfert intermédiaire N :

. en mémorisant préalablement une table de linéarisation $p'(p,q)$, $q'(p,q)$ caractérisant les distorsions du système d'acquisition,

. en corrigeant préalablement les
 20 informations brutes (p, q) au moyen de ladite table de linéarisation, en vue d'obtenir des informations corrigées p' , q' ,

. en calculant la fonction de transfert N sous la forme linéaire, conformément à la revendication 4 :

$$25 \quad \left(\begin{array}{l} u = F(p,q) = \frac{ap' + bq' + c}{qp' + hq' + 1} \\ \left(\right. \end{array} \right.$$

$$\left. \left(\begin{array}{l} v = G(p,q) = \frac{dp' + eq' + f}{qp' + hq' + 1} \\ \left(\right. \end{array} \right. \right.$$

$$30 \quad \left(\begin{array}{l} w = 0 \end{array} \right.$$

8/ - Procédé d'étalonnage selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur (U, V, W) au référentiel
 35 terminal est définie :

. en fixant la mire de calibration sur le bâti fixe dans une position prédéterminée connue et en mémorisant les données correspondantes,

. en définissant et mémorisant, à partir de
 40 ces données, une matrice M_{AC} de passage du référentiel capteur

(U, V, W) au référentiel absolu (X, Y, Z) pour la position de calibration,

. en mémorisant la matrice M_{AT} délivrée par les moyens de détermination dans la position de calibration, matrice notée M_{AT0} ,

. et en calculant la matrice M_{TC} à partir des matrices précitées : $M_{TC} = (M_{AT0})^{-1} \cdot M_{AC}$

9/ - Procédé d'étalonnage selon l'une des revendications 1 à 7, caractérisé en ce que la matrice M_{TC} de passage du référentiel capteur (U, V, W) au référentiel terminal (R, S, T) est définie :

. en réalisant l'acquisition d'au moins un point caractéristique d'une mire de référence dans P positions de l'ensemble-capteur, en vue d'acquérir les informations brutes ($p_1, q_1, \dots, p_k, q_k, \dots, p_1, q_1$) représentatives des échos correspondants,

. en calculant au moyen de la fonction de transfert intermédiaire (N) les coordonnées correspondantes ($u_1, v_1, w_1, \dots, u_k, v_k, w_k, \dots, u_1, v_1, w_1$) dans le référentiel-capteur,

. en mémorisant les matrices ($M_{AT1}, \dots, M_{ATk}, \dots, M_{AT1}$) délivrées pour chacune des positions d'acquisition par les moyens de détermination,

. en résolvant le système d'équations suivant en vue de calculer l'inconnue M_{TC} :

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{ATk} \end{bmatrix} \cdot M_{TC} \begin{bmatrix} u_k \\ v_k \\ w_k \end{bmatrix} \quad 1 \leq k \leq P$$

où $\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$ sont les coordonnées inconnues du point

caractéristique de la mire, éliminées par substitution dans la résolution du système d'équations.

10/ - Procédé d'étalonnage selon la revendication 9, caractérisé en ce que les P positions de l'ensemble-capteur sont engendrées, d'une part, par une rotation en pas à pas de l'organe terminal autour de l'origine du référentiel terminal (R, S, T), d'autre part, par une

translation en pas à pas parallèle à un axe connu lié audit référentiel terminal (R, S, T), de sorte que la matrice M_{TC} soit constituée par la position de l'origine du référentiel terminal dans le référentiel capteur (U, V, W) et par l'orientation dudit référentiel terminal dans le référentiel capteur, la résolution du système d'équations précité étant effectué en le scindant en deux sous-systèmes indépendants, l'un utilisant les points fournis par la rotation et donnant la position de l'origine précitée, l'autre utilisant les points fournis par la translation et donnant l'orientation du référentiel terminal (R, S, T).

11/ - Procédé d'étalonnage selon les revendications 1 à 9, caractérisé en ce que le calcul de la fonction de transfert intermédiaire (N) et le calcul de la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal s'effectuent chacune en établissant un système d'équations redondant et en le résolvant au sens des moindres carrés.

12/ - Système d'acquisition de forme apte à délivrer les coordonnées (x, y, z) représentatives de la forme d'un objet tridimensionnel dans un référentiel dit absolu (X, Y, Z), ledit système comprenant un bâti fixe auquel est lié le référentiel absolu, un organe terminal mobile auquel est lié un référentiel dit terminal (R, S, T), un jeu d'actionneurs adapté pour mouvoir l'organe terminal par rapport au bâti fixe, des moyens (1b, 7c, 6a, 6h, 5a) de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe apte à mémoriser une matrice M_{AT} de passage du référentiel terminal (R, S, T) au référentiel absolu (X, Y, Z), un ensemble-capteur porté par l'organe terminal et adapté pour émettre vers l'objet tridimensionnel une onde structurée et pour capter l'écho renvoyé par ledit objet, et des moyens de stockage des informations issues de l'ensemble-capteur dites informations brutes représentatives des échos captés, ledit système étant caractérisé en ce qu'il comprend des moyens d'étalonnage en vue de la mise en oeuvre du procédé conforme à l'une des revendications 1 à 11, comportant :

- une mire de calibration présentant des reliefs de géométrie et dimensions connues,

- des moyens de fixation de la mire de calibration sur le bâti,
- des moyens de mémorisation comprenant une
 - 5 zone-mémoire pour les informations de définition géométrique relatives à la mire de calibration et une zone-mémoire pour la matrice (M_{TC}) de passage du référentiel capteur au référentiel terminal,
 - et un calculateur adapté et programmé pour
 - 10 réaliser la transposition en coordonnées des informations de définition géométrique, pour calculer la fonction de transfert intermédiaire (N), et pour calculer par composition la fonction de transfert globale (L).
- 13/ - Système d'acquisition selon la
 - 15 revendication 12, caractérisé en ce que la mire de calibration comprend une plaque dotée d'un maillage de piques.
- 14/ - Système d'acquisition selon l'une des revendications 12 ou 13, apte à réaliser un étalonnage conforme à la revendication 8, caractérisé en ce que :
 - 20 . les moyens de fixation de la mire de calibration sont adaptés pour assurer la fixation de ladite mire dans une position prédéterminée connue par rapport au bâti,
 - . les moyens de mémorisation comprennent une
 - 25 zone-mémoire pour les données de position correspondantes de ladite mire, et une zone-mémoire pour la matrice (M_{AC}) de passage du référentiel capteur au référentiel absolu,
 - . le calculateur est adapté et programmé pour définir la matrice (M_{AC}) et pour calculer la matrice M_{TC} à
 - 30 partir des matrices M_{AC} et M_{AT0} .
 - 15/ - Système d'acquisition selon l'une des revendications 12 ou 13, apte à réaliser un étalonnage conforme à la revendication 9, caractérisé en ce que :
 - . ledit système comprend une mire de
 - 35 référence présentant au moins un point caractéristique et des moyens de fixation de la mire de référence sur le bâti,
 - . les moyens de mémorisation comprennent une zone-mémoire pour les matrices $M_{AT1} \dots M_{ATn}$,
 - . le calculateur est adapté et programmé pour
 - 40 résoudre le système d'équations en M_{TC} .

16/ - Système d'acquisition selon la revendication 15, caractérisé en ce que le calculateur est programmé par un logiciel de résolution du système d'équations en 11_T , du type de celui représenté par le logigramme de la figure 8.

17/ - Système d'acquisition selon l'une des revendications 12, 13, 14, 15 ou 16, dans lequel l'ensemble-censeur comprend un système d'éclairage apte à émettre au moins un faisceau lumineux lamellaire vers l'objet et un dispositif vidéo apte à filmer l'objet avec une parallaxe constante par rapport aux faisceaux du système d'éclairage en vue de délivrer des informations brutes (p, q) fonction des colonnes (p) et lignes (q) des images des points de la trace de chaque faisceau sur l'objet ou la mire de calibration.

18/ - Système d'acquisition selon la revendication 17, caractérisé en ce que le calculateur est programmé par un logiciel de calcul de la fonction de transfert intermédiaire, du type de celui représenté par le logigramme de la figure 7a.

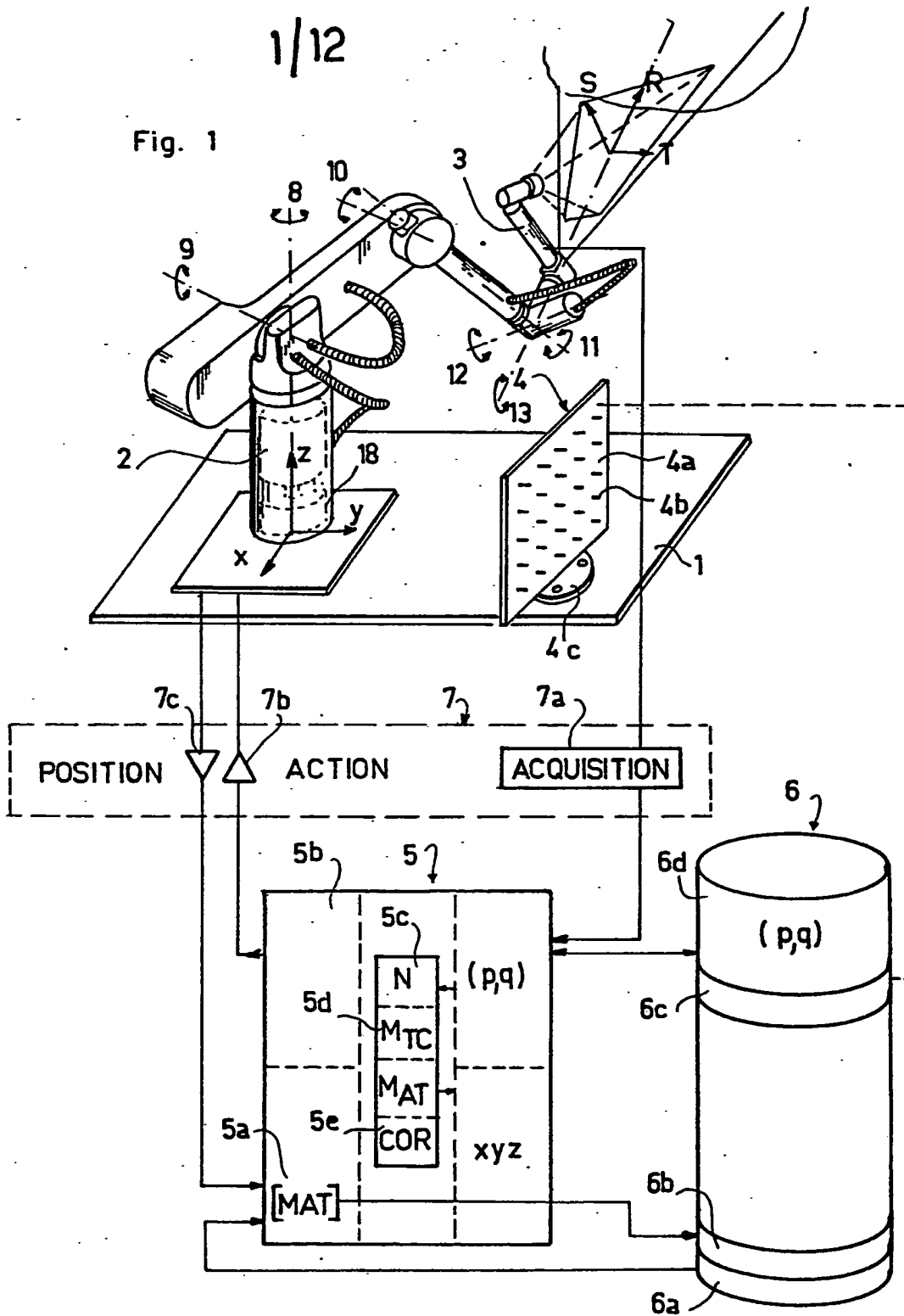
19/ - Système d'acquisition selon l'une des revendications 12 à 18, dans lequel :

. le jeu d'actionneurs est constitué par une chaîne cinématique de moteurs, l'un solidaire du bâti et un autre portant l'organe terminal,

. les moyens de détermination de la position et de l'orientation du terminal par rapport au bâti fixe comprennent des censeurs de position angulaire associés à chaque moteur, des moyens de comptage des signaux issus des capteurs, un module de calcul programmé pour engendrer la matrice 11_{AT} à partir des informations issues des moyens de mémorisation précités et desdits moyens de comptage, et une mémoire de stockage de ladite matrice 11_{AT} .

1/12

Fig. 1



2/12

Fig. 2

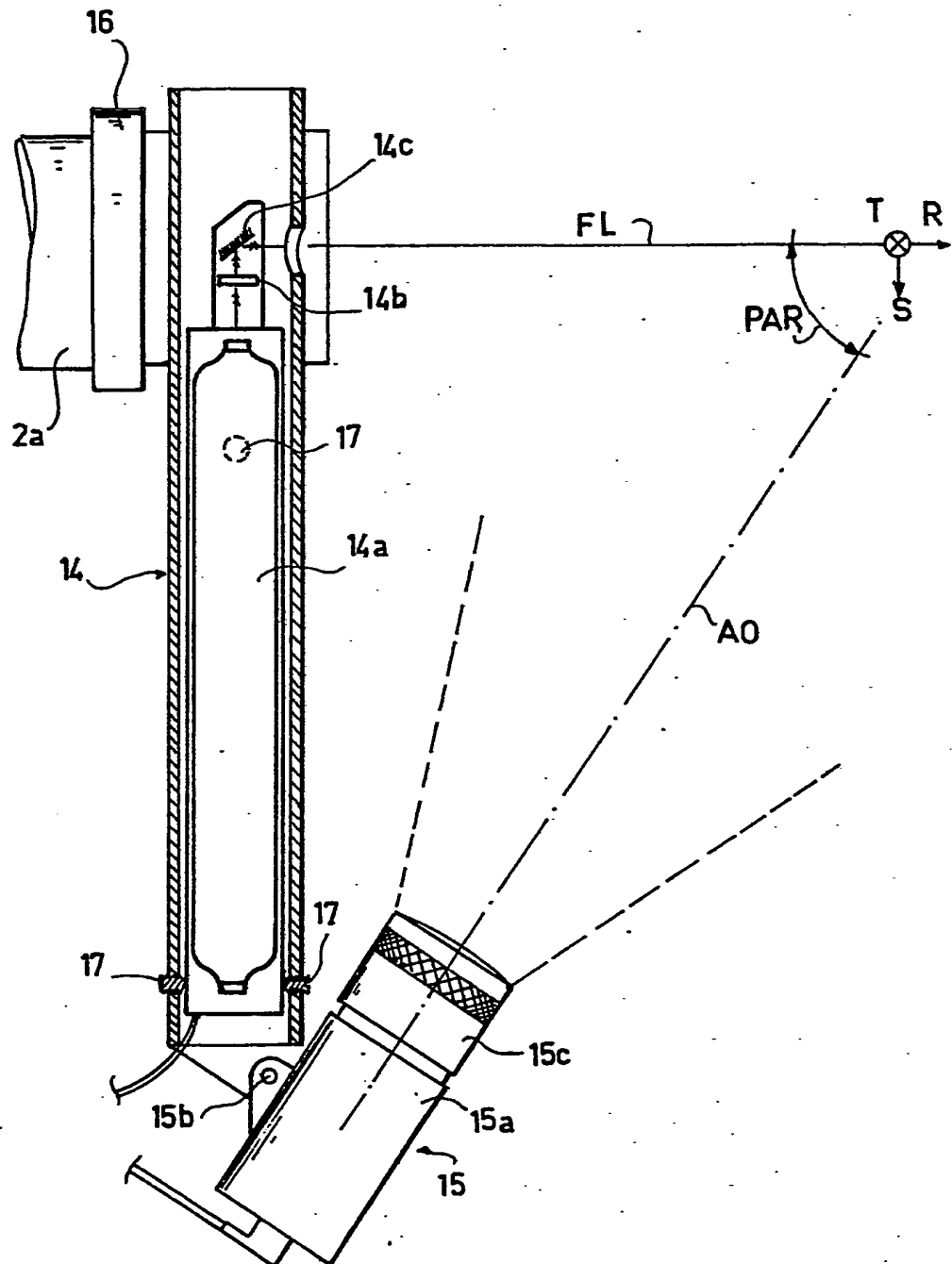
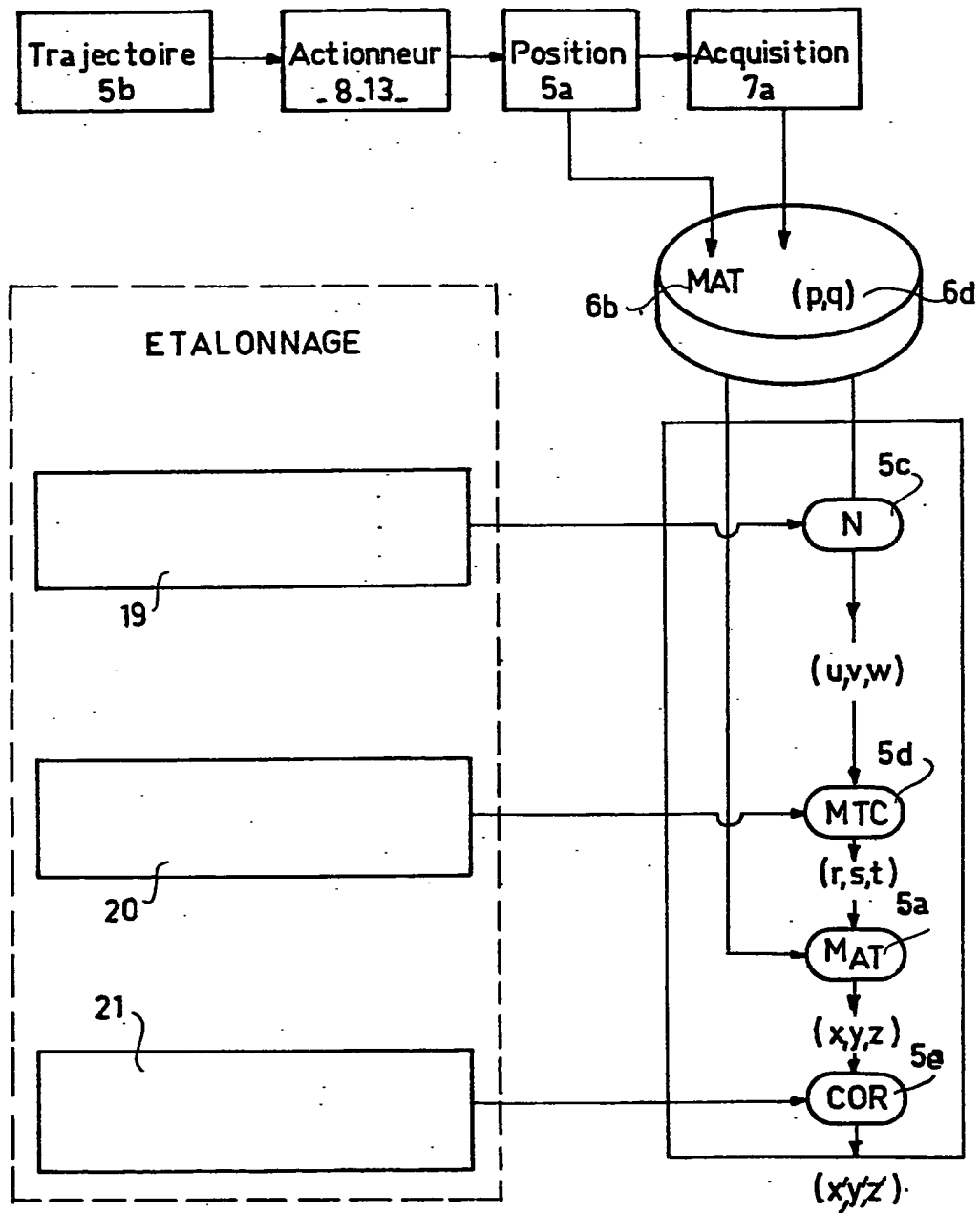


Fig. 3



4 / 12

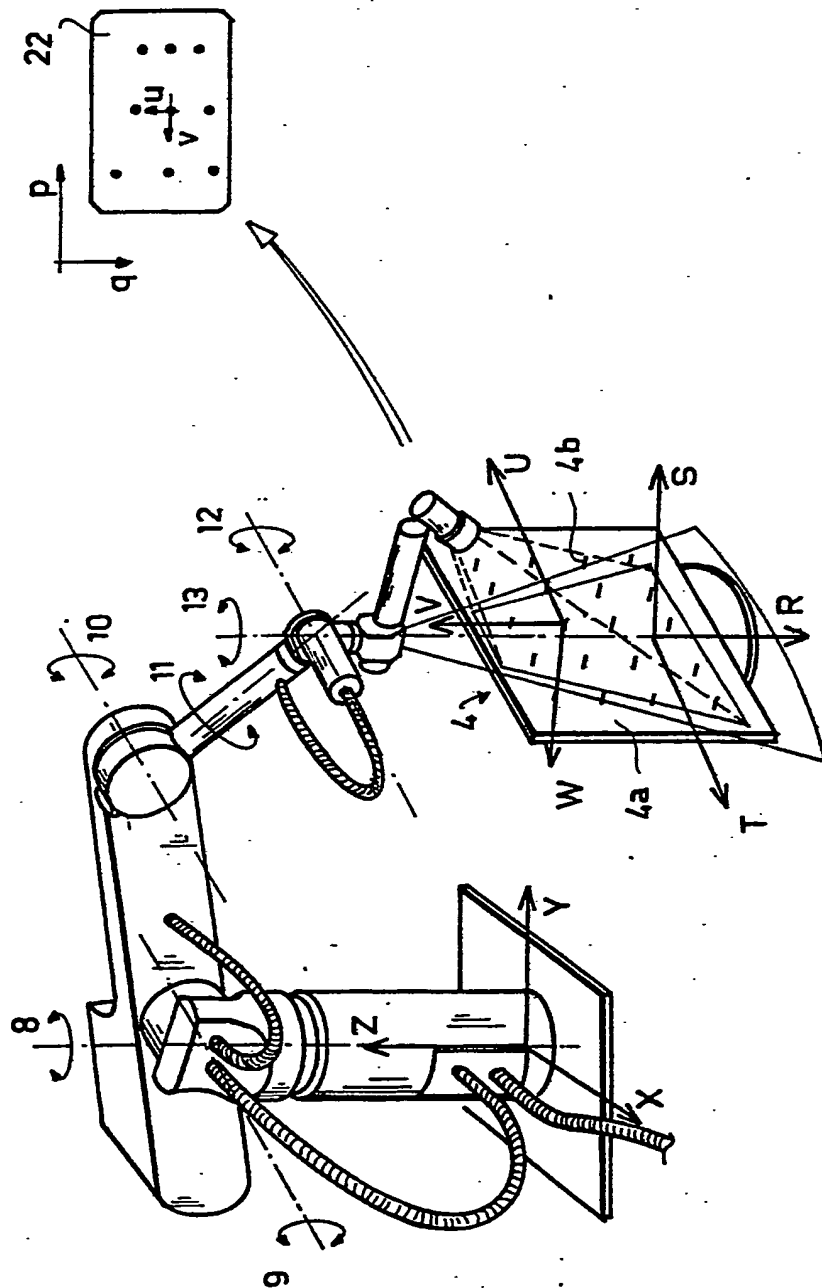


Fig. 4

5 / 12

Fig. 5a

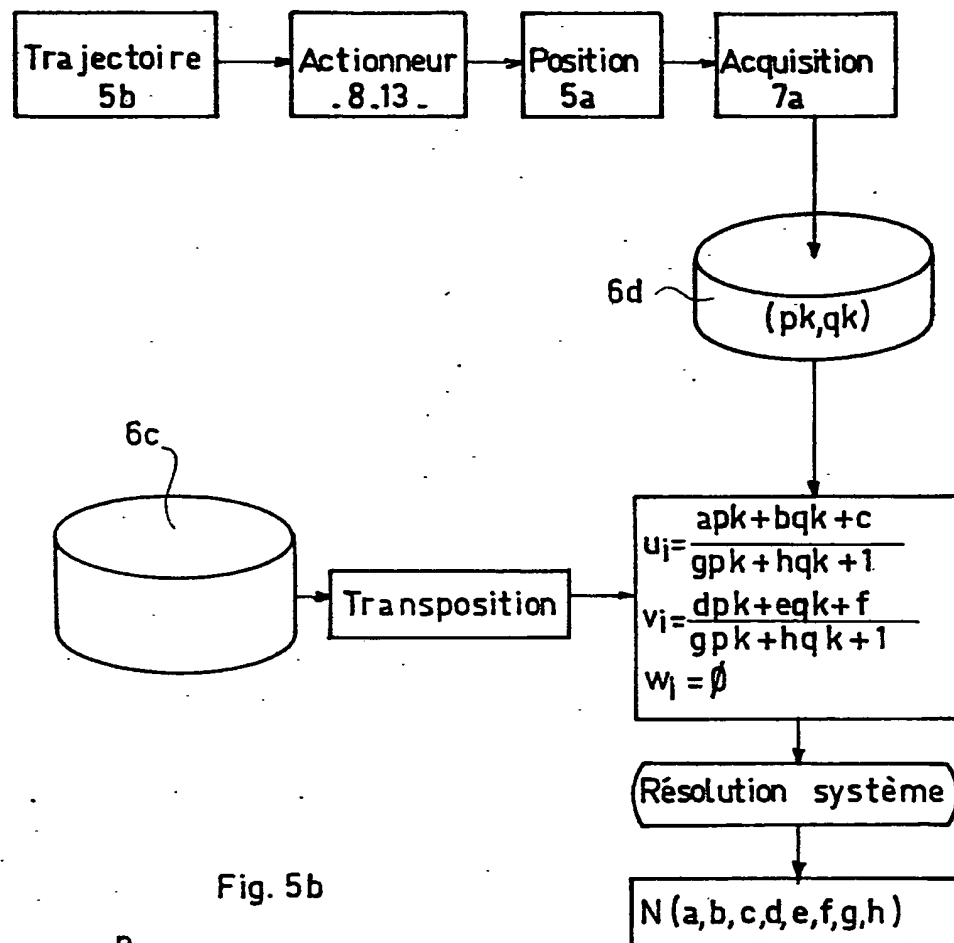


Fig. 5b

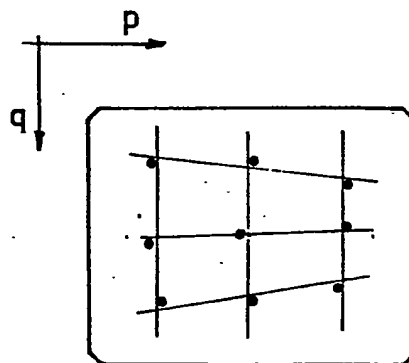
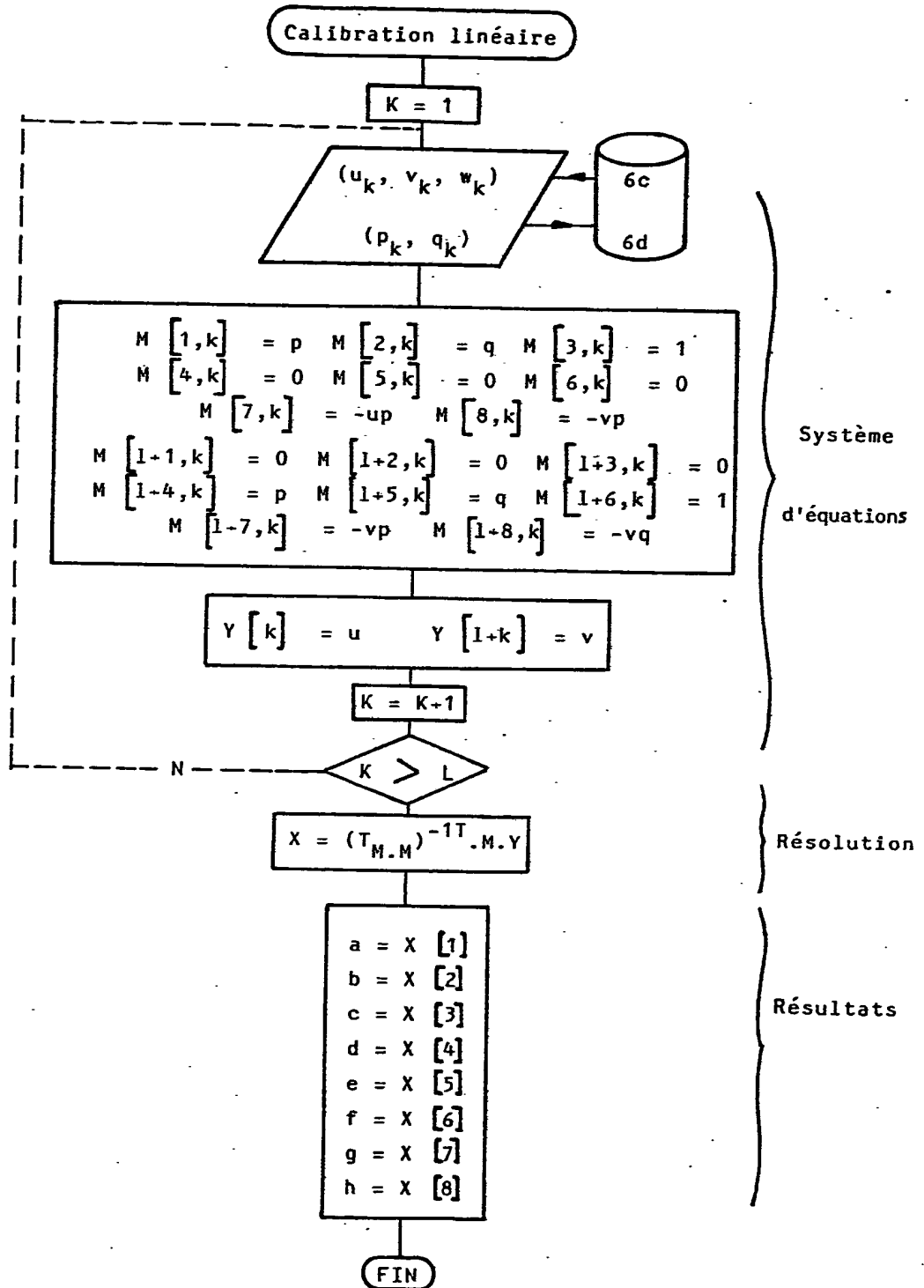


Fig. 6

6/12



7/12

Fig. 7a

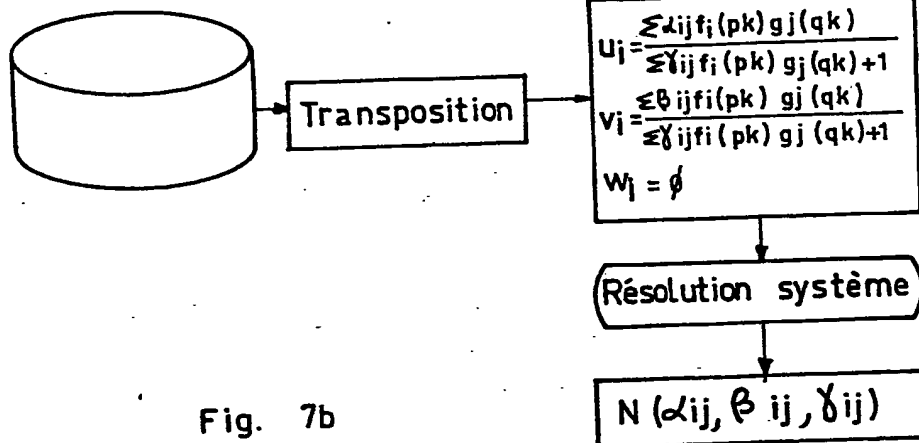
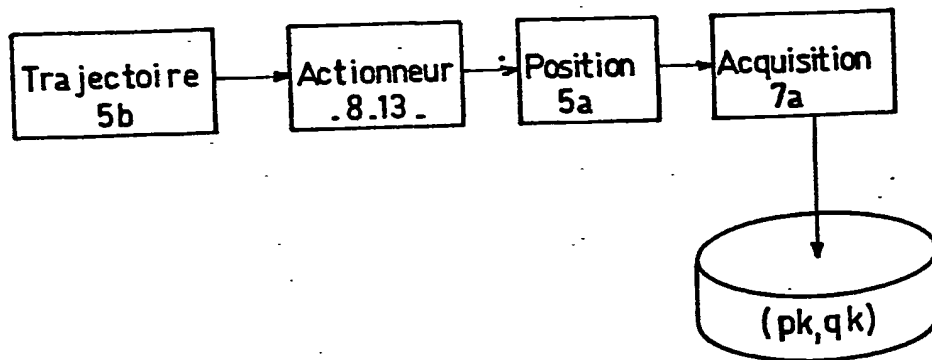
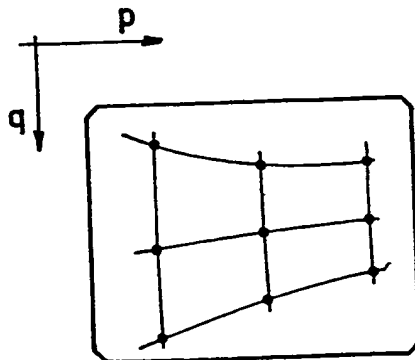
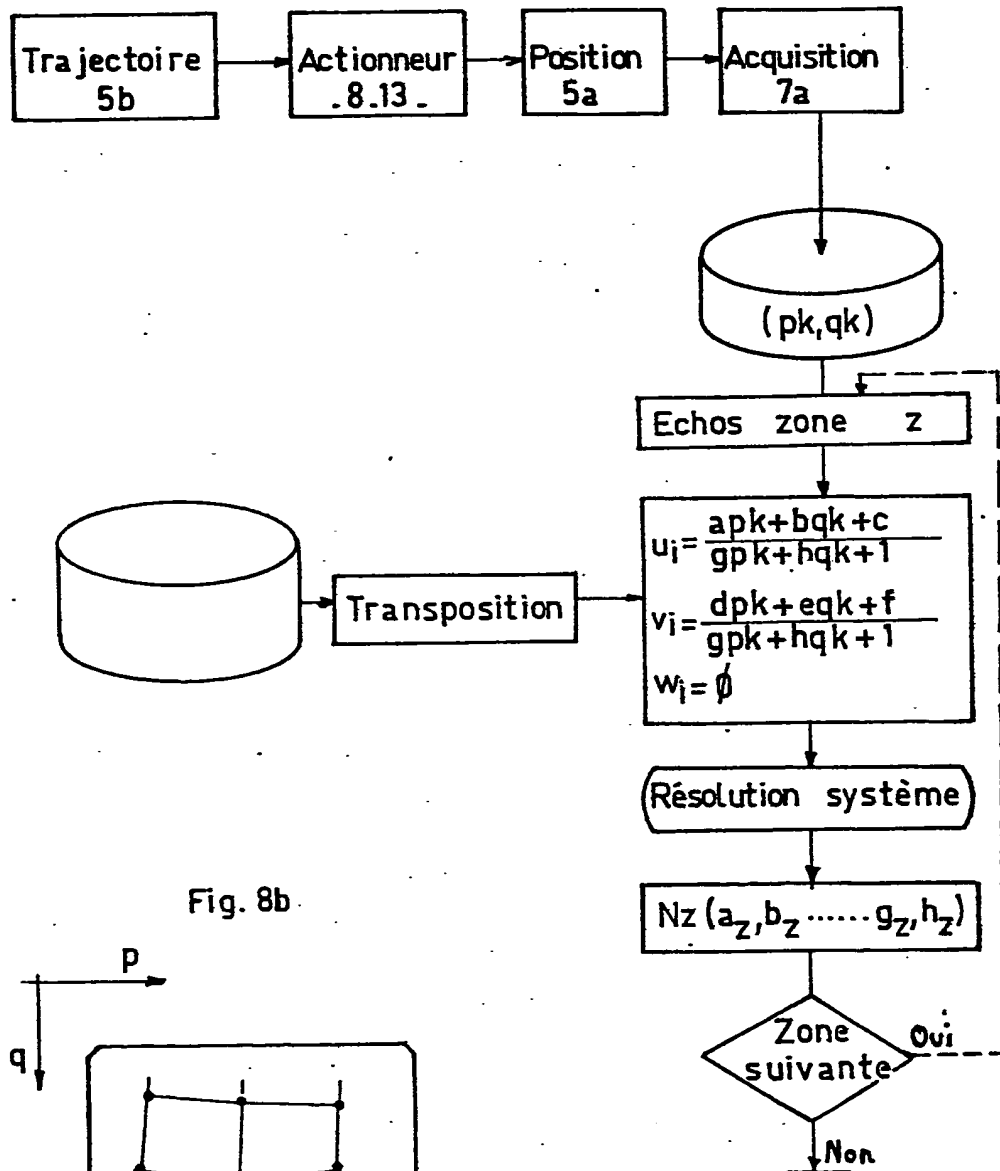


Fig. 7b



8/12

Fig. 8a



9/12

Fig. 9a

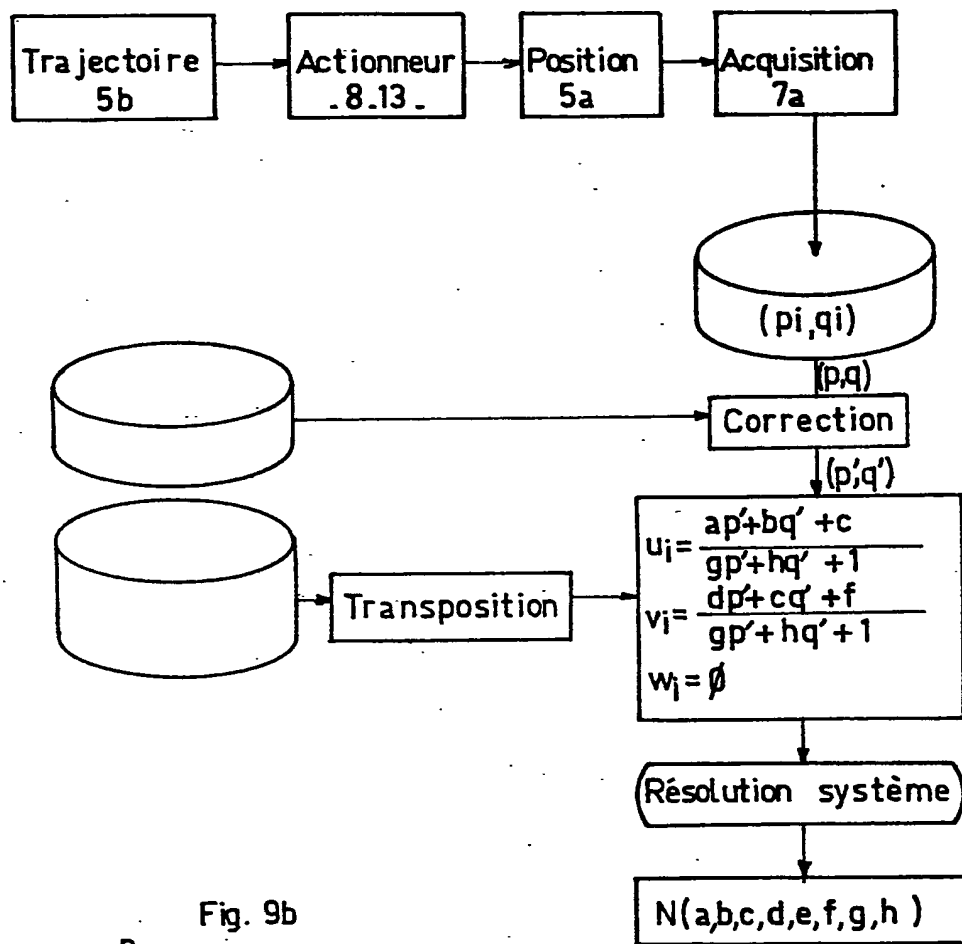


Fig. 9b

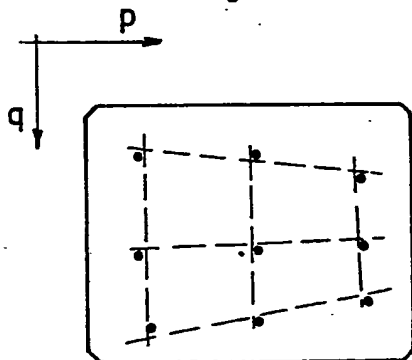
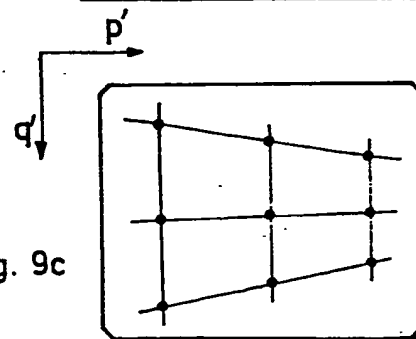


Fig. 9c



10/12

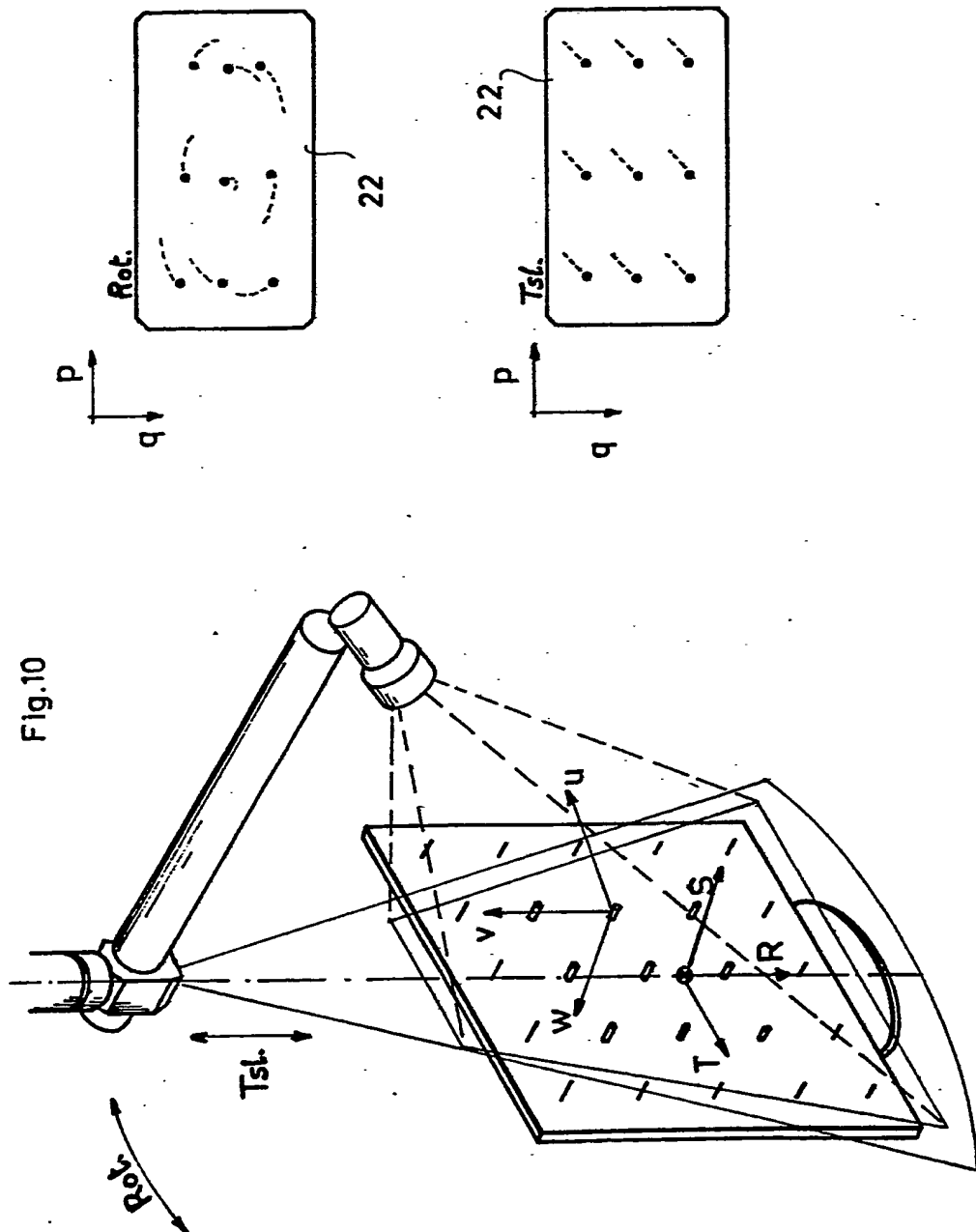
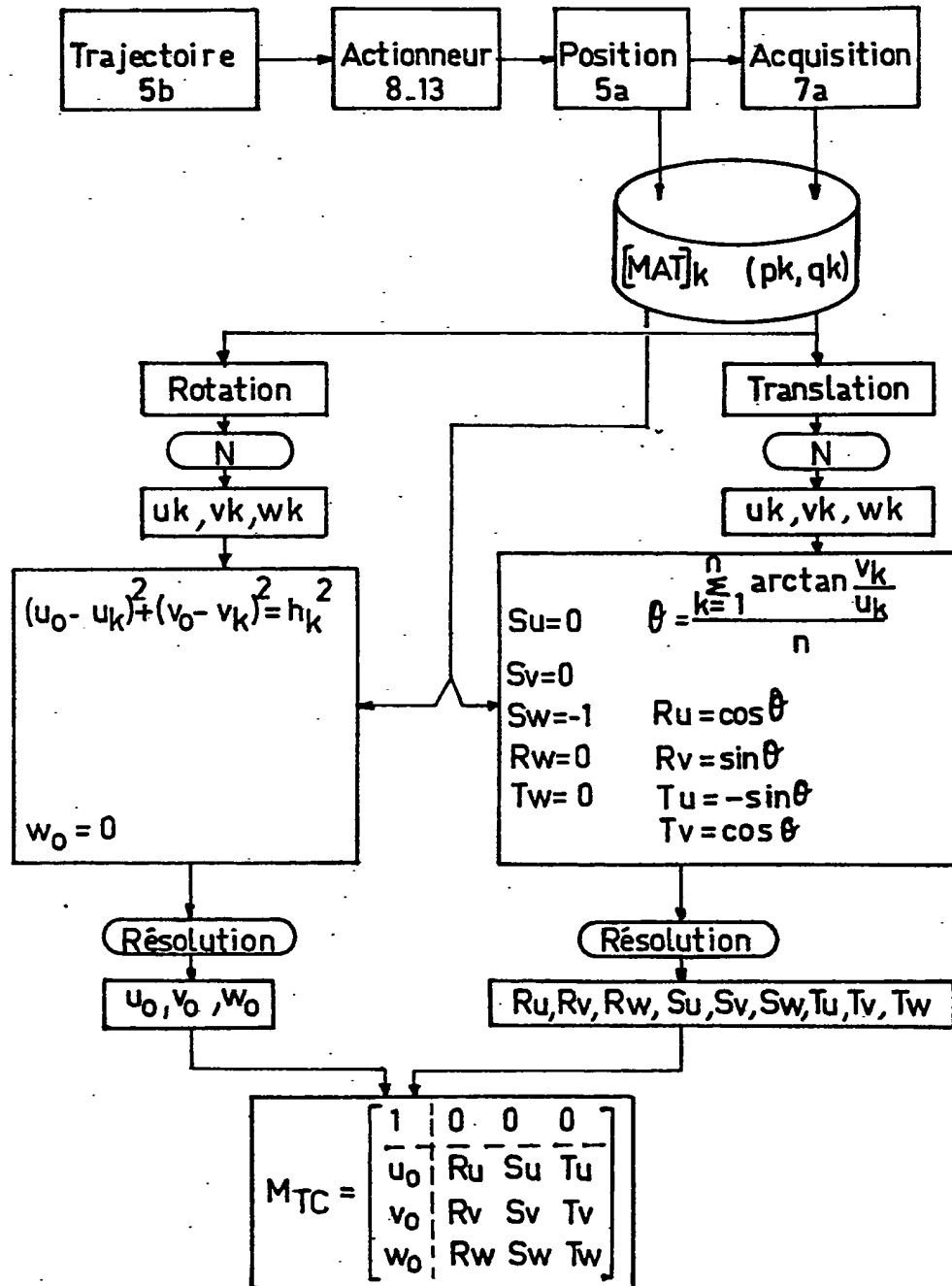


Fig. 11

11/12



12/12

Fig.12

